Emise a vlastnosti prachových částic ze spalování nedřevní biomasy

Jakub LACHMAN [1,*], *Markéta KALIVODOVÁ* [1], *Jakub NÁBĚLEK*[2], *Marek BALÁŠ*[1], *Pavel DIVIŠ*[2]

[1] *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Technická 2896/2, 616 69, Brno, Česká republika*

[2] *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie potravin a biotechnologií Purkyňova 464/118, 612 00, Brno, Česká republika*

*** Email:** Jakub.Lachman@vutbr.cz

Hmotnostní koncentrace prachových částic ve spalinách je z environmentálního hlediska jedním z hlavních sledovaných faktorů při spalování tuhých biopaliv. Pro komplexní vyhodnocení dopadu prachových částic na životní prostředí je dále vhodné tato měření doplnit jejich velikostní distribucí, morfologií a prvkovým složením. V rámci studie byly tyto faktory souběžně sledovány při spalování tří různých biopaliv: smrkového dřeva, slunečnicových slupek a zbytků ze zpracování kukuřice. Zdaleka nejvyšší koncentrace byly naměřeny při spalování slunečnice (375,2 mg·m^{-3}). Při spalování dřeva byly koncentrace podstatně nižší (28,2 mg·m^{-3}), u kukuřice potom 177,2 mg·m^{-3}. Dále bylo zjištěno, že provoz kotle na sníženém výkonu má vliv nejenom na celkovou hmotnostní koncentraci, ale i na velikostní distribuci prachových částic.

Klíčová slova: prachové částice, nedřevní biomasa, velikostní distribuce

1 Úvod

Prachové částice jsou jedním z hlavních polutantů ze spalování tuhých paliv. Nejčastěji je sledována jejich celková hmotnostní koncentrace ve spalinách. Pro komplexní vyhodnocení je však vhodné tento údaj doplnit i měřením velikostní distribuce prachových částic, jejich morfologií a prvkovým složením. Tyto faktory mohou napomáhat při navržení systému odlučování částic, při zhodnocení jejich dopadu na životní prostředí apod. V posledních letech dále roste zájem o energetické využití nedřevní biomasy, a to i v kontextu domovního vytápění [1, 8]. Prachové částice ze spalovaní nedřevní biomasy se často svým složením a velikostní distribucí liší od částic vzniklých spalováním dřeva.

Při garančních měřeních kotlů pro domovní vytápění jsou běžně sledovány dva provozní stavy: nominální výkon a redukovaný výkon, který dle platné normy ČSN EN 303-5 představuje 30 % nominálního výkonu. Směrnice pro Ekodesign navíc přikládá emisím produkovaným za sníženého výkonu vyšší podíl než za nominálního, a to 85 %. Emisím na různých výkonových hladinách kotle se již některé studie věnovaly [2, 3, 4], avšak ne vlivem těchto provozních režimů na velikostní distribuci prachových částic. K tomuto cíli byl v rámci této studie použit nízkotlaký impaktor Dekati DLPI+. Obdobné zařízení bylo použito například Yangem a kol.

[5] při sledování částic ze spalování kukuřičných stonků, nebo Hanem a kol. [6] při sledování přenosu anorganické složky tuhých biopaliv. Pro zvolená paliva byla v této studii velikostní distribuce i hmotnostní koncentrace sledována jak za nominálního, tak za sníženého výkonu.

2 Popis experimentu

V rámci provedeného experimentu byly sledovány emise a vlastnosti prachových částic ze spalování tří tuhých biopaliv: smrkového dřeva, slunečnicových slupek a zbytků ze zpracování kukuřice. Smrkové dřevo a kukuřice byly dodány ve formě 6mm pelet, slunečnice ve formě pelet o průměru 8 mm. Sledovanými vlastnostmi prachových částic byly celková hmotnostní koncentrace ve spalinách stanovena v souladu s ČSN EN 13284-1, velikostní distribuce, morfologie a prvkové složení. V tomto příspěvku bude věnována větší pozornost celkové hmotnostní koncentraci, velikostní distribuci a plynným emisím ze spalování jednotlivých biopaliv.

2.1 Rozbory paliv

U všech paliv byly provedeny základní palivářské rozbory, tedy stanovení vlhkosti dle ČSN EN 18134-3, prchavé hořlaviny dle ČSN EN 18123 a popeloviny dle ČSN EN 18122. Spalné teplo a výhřevnost byly stanoveny v souladu s ČSN EN 18125. U všech paliv byl dále proveden prvkový rozbor pomocí analyzátoru CHNOS Elemental Analyzer. Rozbory paliv jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1 Hrubý a prvkový rozbor měřených biopaliv

	Surový stav			*Bez vody a popeloviny (hm.%)*						
	Výhřevnost ($MJ \cdot kg^{-1}$)	Vlhkost (hm.%)	Popelovina (hm.%)	Prchavá hořlavina	C	H	N	S	O	Cl
Dřevo	16,1	7,3	0,4	84,6	49,7	7,2	0,03	<0,003	43,0	<0,0005
Slunečnice	16,0	11,5	7,9	82,3	52,7	7,7	2,2	0,3	37,3	0,0046
Kukuřice	15,4	8,8	6,2	83,8	48,9	7,8	2,1	0,14	41,1	0,1065

Obr. 1 Pelety z jednotlivých biopaliv (zleva smrkové dřevo, slunečnice a kukuřice)

2.2 Provozní podmínky a plynné emise

Laboratorní měření byla realizována na automatickém kotli na tuhá paliva s roštovým hořákem. Měření byla provedena jak na nominálním výkonu (25 kW), tak i na výkonu sníženém (7,5 kW). Před samotným měřením byl vždy kotel uveden do stálého chodu na provozní teplotě, tj. 60 °C na vstupu a 75–85 °C na výstupu. Teplotní rozdíl byl regulován průtokem vody kotlem. Po ustálení měřeného výkonu a plynných emisí byly v cca dvouhodinovém okně provedeny potřebné odběry částic. Plynné emise byly měřeny v reálném čase analyzátorem Horiba VA-5000 series. Hodnoty plynných emisí byly zaznamenávány každých 5 sekund, hodnoty měřeného výkonu každé 3 sekundy. Udávané hodnoty plynných emisí a výkonu kotle byly stanoveny jako průměr měřených hodnot během vzorkování prachových částic. Plynné emise (měřeny v suchých spalinách a za normálních podmínek) byly dále přepočteny na referenční obsah kyslíku 10 % dle následujícího vztahu:

$$koncentrace\ (ref.) = koncentrace\ (měřená) \cdot \frac{21-10}{21-O_{2,měřená}} \tag{1}$$

2.2.1 Vzorkování prachových částic

Vzorkování prachových částic bylo provedeno dvěma způsoby: manuální gravimetrickou metodou pro stanovení celkové koncentrace částic ve spalinách (v souladu s ČSN EN 13284-1) a pomocí nízkotlakého impaktoru Dekati HT-DLPI [7] pro stanovení velikostní distribuce. Vzorky odebrané manuální gravimetrickou metodou byly dále uschovány pro sledování morfologie prachových částic a pro stanovení jejich prvkového složení metodou ICP-OES.

3 Výsledky a diskuze

Průměrné koncentrace plynných emisí a prachových částic naměřené v obou režimech jsou pro všechna paliva uvedeny v následující tabulce. Z naměřených hodnot jde u všech paliv vidět výrazný rozdíl mezi nominálním a sníženým výkonem z hlediska chemického nedopalu, tedy emisí CO a TOC. Provoz na snížením výkonu obecně probíhá s vyšším přebytkem spalovacího vzduchu a za nižších teplot ve spalovací komoře, což má negativní dopad na kinetiku spalovacích reakcí. Největší rozdíl byl pozorován u slunečnicových pelet, kdy emise CO za sníženého výkonu nabývaly více než sedminásobných hodnot oproti výkonu nominálnímu. Při spalování dřeva byl pozorovaný rozdíl v emisích CO minimální. Naopak emise TOC byly za sníženého výkonu podstatně nižší. U obou agropaliv byly pozorovány zvýšené emise NO_x a SO_2, což bylo vzhledem k jejich složení očekávané. Teploty v ohništi i přebytek vzduchu byly u všech sledovaných paliv obdobné, a to jak za nominálního, tak za sníženého výkonu. Lze tedy tvrdit, že emise NO_x u slunečnice a kukuřice pochází převážně z dusíku vázaného v palivech.

Tab. 2 Průměrné hodnoty plynných emisí a O_2, emisí prachových částic a výkonu kotle

	NO_x	SO_2	CO	TOC	Prachové částice	O_2	Výkon kotle
			mg·m^{-3}			*obj.%*	*kW*
Dřevo (nominální)	143,4	2,4	290,2	1,72	28,2 ± 1,97	9,15	24,5
Dřevo (snížený)	152,4	6,7	284,7	6,5	68,8 ± 5,16	12,53	7,2
Slunečnice (nominální)	440,0	113,2	242,7	3,9	375,2 ± 26,24	9,91	25,3
Slunečnice (snížený)	576,6	128,8	1727,5	24,0	379,1 ± 22,73	12,13	7,8
Kukuřice (nominální)	723,5	115,9	218,7	3,4	177,2 ± 12,60	9,6	24,8
Kukuřice (snížený)	697,0	184	671,7	8,3	128,1 ± 3,65	11,11	7,6

Průměrné koncentrace prachových částic se napříč jednotlivými palivy také výrazně liší. U dřevních pelet byl pozorovaný nárůst oproti nominálnímu výkonu způsoben především vyšší úrovní nedopalu, a tedy vyšší produkcí sazí. To bylo pozorováno i na plynných emisích (CO a TOC). Nejvyšší průměrné koncentrace byly naměřeny při spalování pelet ze slunečnice. Zde byl rozdíl mezi nominálním a sníženým výkonem minimální. Vysoké koncentrace lze přisoudit především vyššímu obsahu popeloviny a chloru, neboť při spalovacích zkouškách docházelo k intenzivnímu zanášení kotle chloridem draselným (viz foto níže).

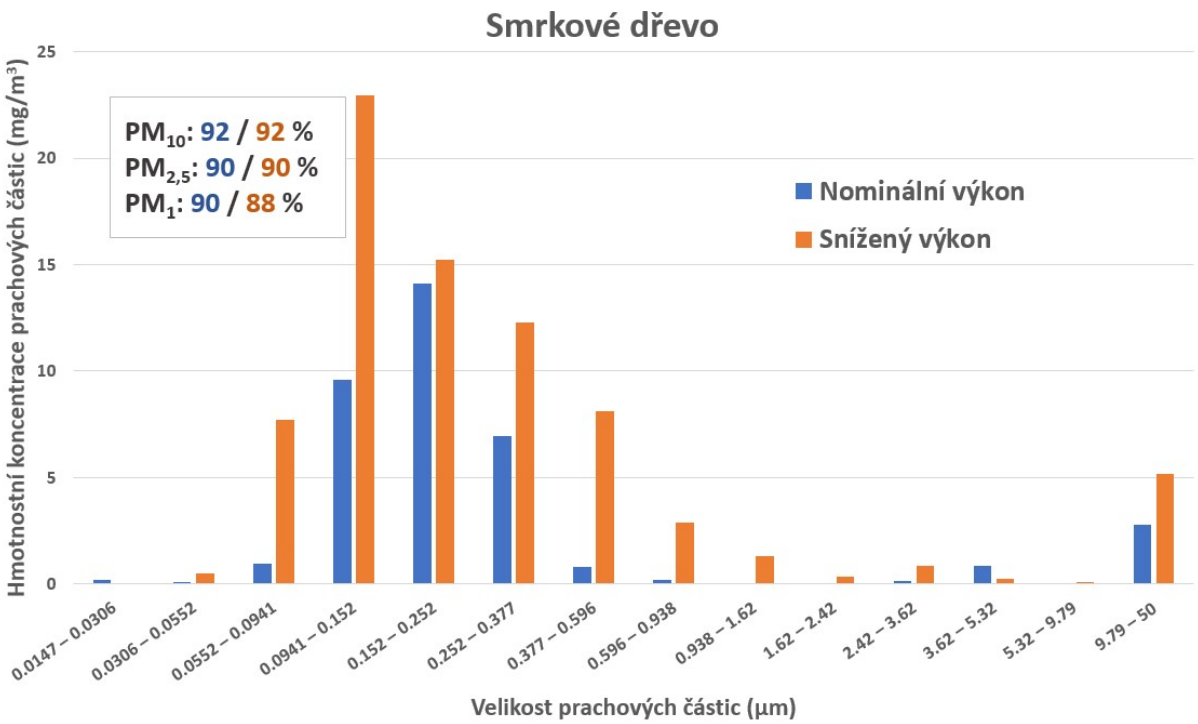
Obr. 2 Nánosy v prvním tahu kotle při spalování pelet ze slunečnice

Stejně tak i deposity prachových částic na odebraných filtrech měly charakteristickou bílou barvu (oproti černým depositům u dřeva způsobených sazemi). Protože je chlorid draselný rozpustný ve vodě, daly by se celkové emise výrazně snížit podkročením rosného bodu spalin, popř. mokrou vypírkou. Tato řešení však dávají smysl až u kotlů s výrazně vyšším výkonem. U kukuřice byl za sníženého výkonu naopak pozorován pokles oproti průměrné koncentraci za nominálního výkonu. I zde se předpokládá vyšší zastoupení popílku v prachových částicích, ovšem za sníženého výkonu bylo pravděpodobně jeho uvolňování do proudu spalin omezeno.

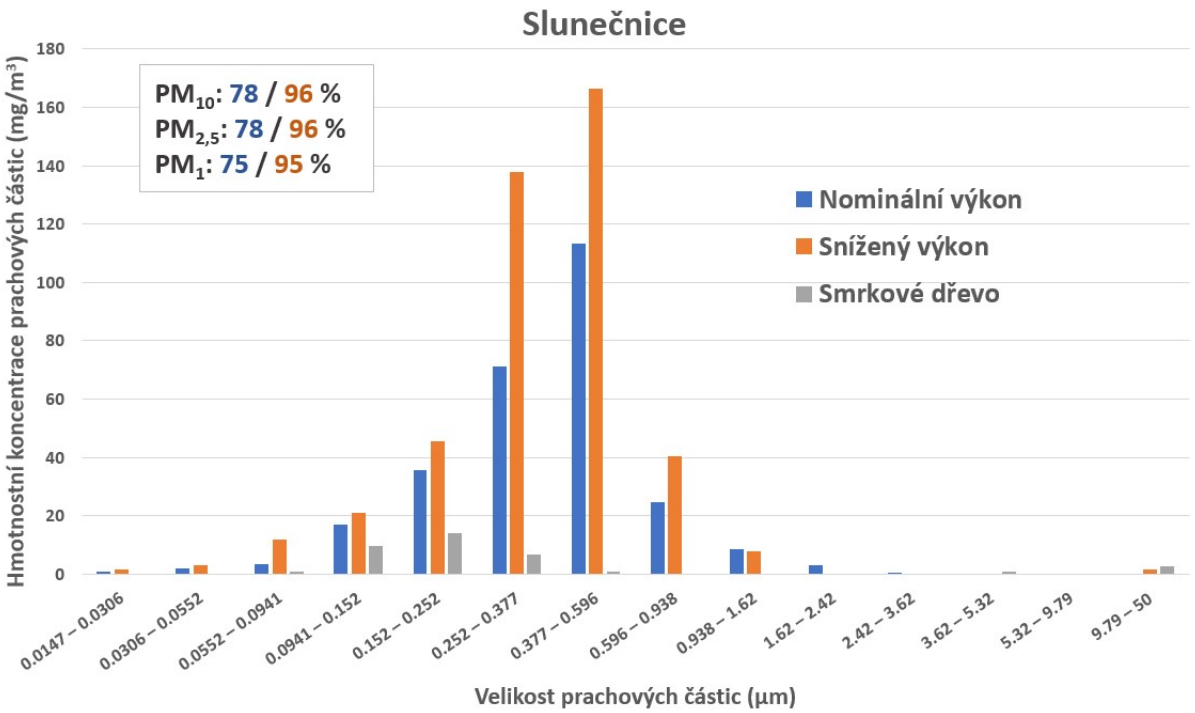
Velikostní distribuce prachových částic je znázorněna v následujících třech schématech. Na horizontální ose je uveden rozsah ekvivalentního aerodynamického průměru jednotlivých pater impaktoru (μm), na vertikální ose potom hmotnostní koncentrace stanovena z navážky každého patra. Celková hmotnostní koncentrace ve spalinách je tak dána jako suma koncentrací jednotlivých pater. Protože však z principu funkce impaktor nezachytí všechny prachové částice, byla vždy celková koncentrace nižší oproti té stanovené referenční gravimetrickou metodou. V každém grafu je navíc uveden podíl prachových částic jednotlivých velikostí, tedy PM10, PM2,5 a PM1, tzn. podíl částic velikosti menší než uvedená hranice (v μm) na celkové hmotnostní koncentraci stanovené manuální gravimetrickou metodou.

S výjimkou nominálního výkonu při spalování slunečnice a sníženého výkonu při spalování kukuřice bylo zastoupení prachových částic v jednotlivých velikostních kategoriích tvořeno 90 a více procenty. Samotný pík velikostní distribuce se napříč palivy lišil: u dřeva nabývala majoritní část prachových částic rozměru okolo 100 nm, u slunečnice okolo 300 nm,

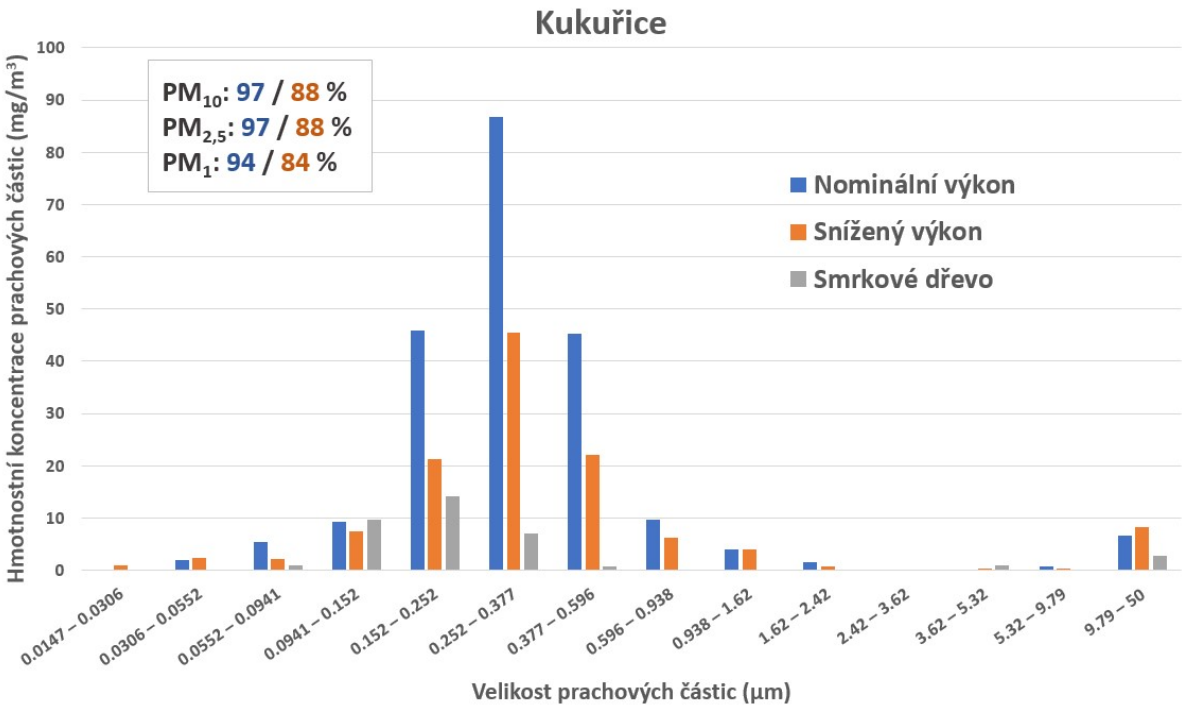
u kukuřice okolo 450 nm. Při sníženém výkonu byl u dřeva i slunečnice pozorován posun píku směrem doprava, tedy k vyšším aerodynamickým průměrům. Oproti tomu byla u kukuřice samotná velikostní distribuce jednotná, lišila se pouze hmotnostní koncentrace, která odpovídá pozorovaným výsledkům manuální gravimetrické metody.



Obr. 3 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování dřevních pelet



Obr. 4 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování slunečnicových pelet



Obr. 5 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování kukuřičných pelet

4 Závěr

Cílem experimentu bylo sledování změn ve velikostní distribuci prachových částic, jejich celkových koncentrací a složení při spalování různých tuhých biopaliv za různých režimů. Z provozního hlediska byly zvoleny režimy nominálního a sníženého výkonu, neboť mezi nimi dochází k největším rozdílům v provozních podmínkách. Z praktického hlediska dále měření poskytují informace o emisních charakteristikách kotle z hlediska směrnice pro Ekodesign. Během experimentů bylo zjištěno, že oba režimy mají na velikostní distribuci částic významný vliv, obdobně jako složení paliva. Pro kompletní vyhodnocení vlivu popeloviny na složení částic bude v navazujícím řešení projektu proveden prvkový rozbor pomocí ICP-OES. Dále bude zkoumána morfologie pomocí elektronového mikroskopu.

Poděkování

Tato studie byla vypracována v rámci řešení projektu FCH/FSI-J-22-7919 „Emise a vlastnosti prachových částic ze spalování nedřevní biomasy“ VUT v Brně a dále podpořena z projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000753 „Centrum výzkumu nízkouhlíkových energetických technologií“.

Použitá literatura

[1] BALA-LITWINIAK, Agnieszka a Monika ZAJEMSKA. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. Renewable energy [online]. Elsevier, 2020, 162, 151-159 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2020.07.139

[2] KŘŮMAL, Kamil, Pavel MIKUŠKA, Jiří HORÁK, František HOPAN a Lenka KUBOŇOVÁ. Influence of boiler output and type on gaseous and particulate emissions from the combustion of coal for residential heating. Chemosphere (Oxford) [online]. England: Elsevier, 2021, 278, 130402 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130402

[3] ZIMA, Wiesław, Jan TALER, Sławomir GRĄDZIEL, et al. Thermal calculations of a natural circulation power boiler operating under a wide range of loads. Energy (Oxford) [online]. Elsevier, 2022, 261 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.125357

[4] HORÁK, Jiří, Vendula LACIOK, Kamil KRPEC, et al. Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter. Atmospheric environment (1994) [online]. Elsevier, 2020, 229, 117437 [cit. 2022-12-15]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117437

[5] YANG, Wei, Youjian ZHU, Yu LI, Wei CHENG, Wennan ZHANG, Haiping YANG, Zhiwu TAN a Hanping CHEN. Mitigation of particulate matter emissions from co-combustion of rice husk with cotton stalk or cornstalk. Renewable energy [online]. Elsevier, 2022, 190, 893-902 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2022.03.157

[6] HAN, Jingkun, Dunxi YU, Jianqun WU, Xin YU, Fangqi LIU a Minghou XU. Effects of torrefaction on ash-related issues during biomass combustion and co-combustion with coal. Part

1: Elemental partitioning and particulate matter emission. Fuel (Guildford) [online]. Elsevier, 2023, 334 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2022.126776

[7] ELBL, Patrik, Tomáš SITEK, Jakub LACHMAN, Martin LISÝ, Marek BALÁŠ a Jiří POSPÍŠIL. Sewage sludge and wood sawdust co-firing: Gaseous emissions and particulate matter size distribution. Energy (Oxford) [online]. Elsevier, 2022, 256 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.124680

[8] Elbl, P.; Baláš, M.; Vavříková, P.; Lisý, M.; Milčák, P. Gaseous Emissions and Solid Particles from the Combustion of Biomass Pellets in 25kW Automatic Boiler. In Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal, 27–30 May 2019; pp. 742–748.